

浅層大断面トンネルに関する調査研究

INVESTIGATION ON TUNNELING METHODS FOR LARGE SECTION TUNNEL WITH SHALLOW OVERBURDEN

橋本 正*・濱手慎也**・田村 武***

Tadashi HASHIMOTO, Shinya HAMATE, Takeshi TAMURA

It is understood from the literature on the tunnel construction reserches in japan as well as in foreign countries that one of the most effective methods for the shallow tunnel with a large section is the pre-installion of roof structures to stabilize the ground before excavation. Typical examples of the tunnel-roof installation are as follows. 1) Connection of multi-small-section tunnels which is found in China and France, 2) usage of the highly developed shield-tunnel technology such as the box-shield and 3) application of NATM.

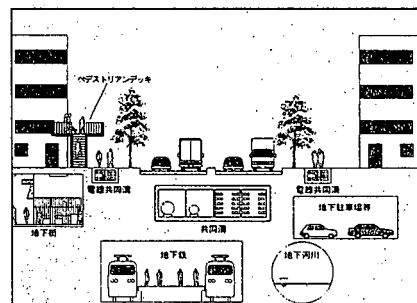
In this paper, these tunneling method are reviewed from the view points of effectiveness, advantage-disadvantage, applicability and cost efficiency.

Key Words: tunneling method, shallow overburden, large section tunnel, tunnel-roof

1. はじめに

都市部における地下空間の有効活用を目的として、地下鉄駅舎、地下駐車場、地下道路、各種ライフラインの複合施設、多目的地下空間などの大規模施設を比較的浅い空間(浅層)にトンネル工法(非開削)を用いて構築するための設計・施工技術について国内外の技術を調査した。その結果、地上の制約条件を受けずに浅層に大断面トンネルを施工する方法として、あらかじめ地下空間のルーフ部を何らかの方法で施工し、上部の荷重に対する安定を図り、地下空間の掘削を実施することが合理的な方法の1つであると考えられる。

この地下空間のルーフ部を地下空間の掘削に先立ち施工する方法として、中国やフランスで採用されている小断面連結工法(小断面トンネルを連結してトンネルルーフを構築する技術)、最近施工技術の発達が著しいシールド工法を利用したボックスシールドやシールドの複合技術等によるトンネルルーフを構築する方法、さらに NATM 工法等の工法が有効であることが明らかになった。



地下駐車場 地下庭園
地下通路 地下河川
地下街 地下道路

図-1 浅層大断面トンネル工法
の利用例(案)¹⁾

* 正会員 (財)大阪土質試験所 特別技術研究室 室長

** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社プロジェクト部

*** フェロー会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授

本報告はこれらの工法について提案を行い、その有効性、メリット・デメリット、適用性、経済性等について言及したものである。

上記のトンネル工法を、以下、「浅層大断面トンネル工法」と呼ぶこととする。浅層大断面トンネル工法の利用例（案）を図-1に示す。

2. 浅層大断面トンネル工法の特徴

上記の需要環境から、ここでは、都市部主要道路下の深度 GL-2m～-3m から GL-10m 程度の浅い空間（浅層地下）を対象とする。浅層大断面トンネル工法の特徴は以下のとおりである。

- (1) 非開削工法である。このため、開削工法などと比較して、施工による地上占有面積が非常に小さく、既存交通の障害とならない。
- (2) 土被りが小さいために、全土被りが作用しても支保規模が小さくてすむ。
- (3) NATM 的な地山アーチ効果は期待できないが、荷重が小さいので、構造物によるアーチアクションで荷重を支持することが可能である。
- (4) 開削工法と比較して、トンネル掘削除荷によるリバウンド量が小さいため、施工部直下に位置する既設構造物に対する影響が小さい。
- (5) 浅層部の掘削時には、地下水位低下が少なく済むため、施工が容易となる。
- (6) 埋設管などは、ほとんどが土被り 2～3m 以内にあるため、施工の障害となりにくい。また、それより深い部分は掘削や埋戻しがされていない自然地山であるため、施工が比較的容易である。
- (7) 最初に仕上がった地下空間から、順次、拡幅・延長施工が行える。また、深部への拡張も可能である。

3. 設計施工事例の紹介

3. 1 北京（中国）の事例²⁾

(1) 概要

北京市地下鉄 8 号線の王府井駅の事例を紹介する。制約条件の内、特記事項を以下に挙げる。

- a. 駅の規模は、総延長 241.1m、幅 24.4m、高さ 14.2m であり、頂部での土被りは 6～7m である。
- b. 現場は古永定河の沖洪積扇状地中下流に位置する。地質は、第四紀の地層に属し、主に人工盛土、粘性土、中細砂、砂礫、玉石層などからなる（図-2 参照）。
- c. 周辺地盤の地山強度比は 0.6 程度と非常に小さい値であるため、緩み・沈下を起こし易い。
- d. 地下水は豊富で、合計 3 層からなる。第 1 層は上層滞水で、深度は 4.5～5m である。またそれは主に軽亜粘土層に位置し、水量・水位などは季節による影響があり、変動幅は比較的大きい。第 2 層は潜水で、深度 13.5m のところに位置し、滞水層は主の中細砂である。第 3 層は被圧水で、深度は 17m、主な帯水層は中粗砂・砂礫及び玉石層であり、最大被圧水頭は 13m である（図-2 参照）。このため、施工中の止水管理およびボーリング管理に留意する必要がある。
- e. 交通量の非常に多い交差点の直下に位置し、大規模な開削工事が許されない。また、地表面土地利用と地下埋設物への影響を考慮して、地表面沈下量を 30mm 以下に抑えなければならない。

(2) 施工方法の決定

以上のような制約条件から、本工事は、杭柱支承法（3 径間 2 階アーチ構造）を採用している。

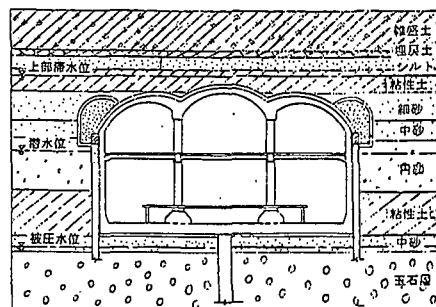


図-2 王府井駅舎地点の地質、水理条件の概念図

(3) 施工順序

施工順序を表-1に示す。

(4) 杭柱支承法の特徴

- 駅舎上部の地下水位より浅い無水の地層の空間を工学的に利用し、地下水位以下の有水の地層での作業（保護柱壁と中間支承の杭柱の施工）を行うことができるため、地下水位低下工法を採用した場合の費用増加と地表面沈下を回避することができる。
- 地下水位以下の空洞切下げ時は、既に保護柱壁が施工されているため、湧水及び土砂ボイリング現象を回避することができる。
- 浅層での地下空洞の掘削における、各施工ステップごとの地山・空洞構造体全体の安定性および信頼性が、確実である。
- 掘削による地表面沈下量を小さく抑えることができる。
- 経済的である。コンクリート取壊し量が少ない（中間隔壁法より15~20%少ない。めがね法より5%少ない。）。
- 大型施工機械を使用し、大規模施工、高速施工を可能とする。

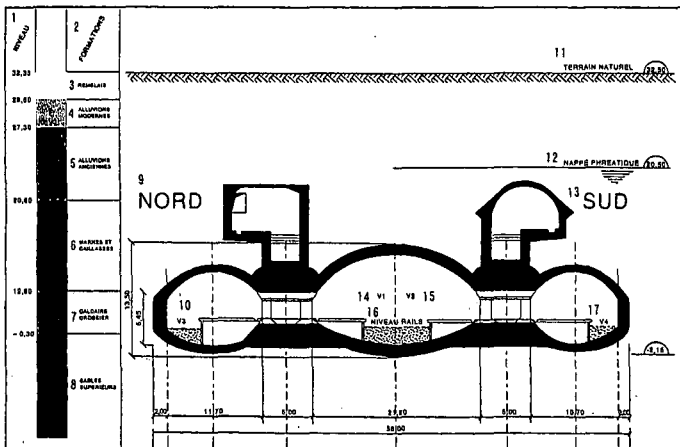
表-1 施工手順（ステップ）表

順序番号	概念図	主要な工事手順及び方法
1		1. 駅舎の上半分断面の地下水位より以後の地層では、南、中央、北に分け、それぞれ杭柱施工のための導坑を設置する。導坑は、薬液注入で地盤を固化した上、格子状コンクリート吹付けを行って安定させる。
2		1. 南と北の両導坑には、φ60の保護杭壁を設置する。特製の穿孔機を使用する。 2. 中央導坑には、φ1250の中杭柱を立てる。間隔は3mで、特製の穿孔機を使用する。
3		1. 杭柱を完了した後、側壁杭間にテント（地幕）注入を行い、それぞれの杭柱の頭部を結ぶ縦梁を作り、一連の杭柱を繋ぎ、側部本孔の初期支承を行う。
4		1. 駅舎側部本孔の上部アーチを掘削し、格子状コンクリート吹付けによる支承を行う。また、パイプ工法（大管留）の採用や、薬液注入による地山固着化を行って、工事前支承とする。施工中は、核心土を残し、導坑を埋戻して側方支承を行う必要がある。
5		1. 第1段切梁を設置し、側方を支えながら下に掘削する。
6		1. 引き続き下へ掘削し、第2段切梁まで掘削する。続いて第2段切梁を設置した後、底版まで掘削する。次に基礎補強を行いながら底版支持層の工事を行う。

3. 2 コンドルセ（フランス）の事例⁹⁾

地域高速鉄道（RER）コンドルセ駅の事例を紹介する。施工ステップを図-4に示す。

- 駅の規模は、総延長228.0m、幅58.0m、高さ13.5mであり、頂部での土被りは約20mである。
- 構造は、スパン21.2mのアーチを持つ中央トンネル、それを支える幅6mの中空支持壁体2基および幅約11mの左右1つずつの側部トンネルからなる（図-3参照）。
- 地質は、大部分が粗い石灰石、泥岩および栗石層に位置する（図-3参照）。
- 施工は、上部砂層内の地下水位を低下させて行う。

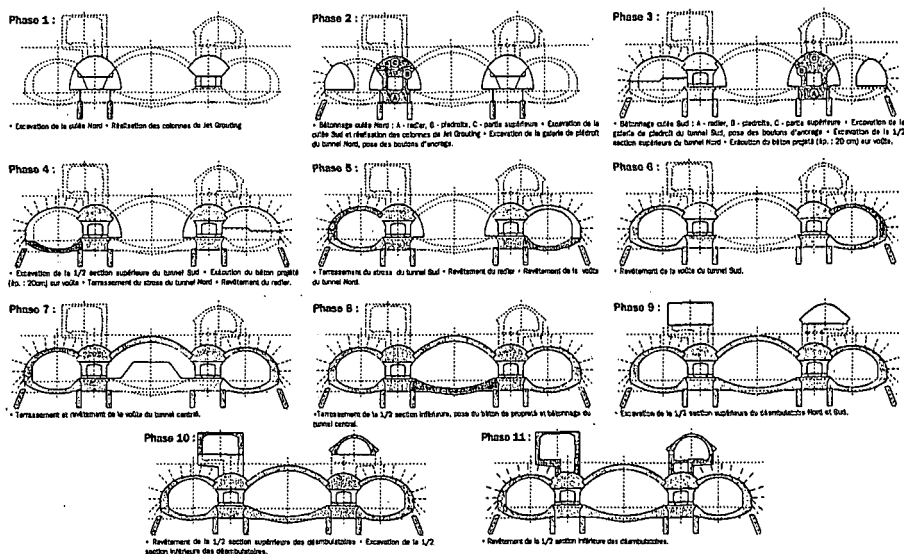


地盤柱状図およびトンネル断面図：

- 1: 標高
- 2: 地層構成
- 3: 盛土
- 4: 新沖積層
- 5: 旧沖積層
- 6: 泥岩およびぐり石
- 7: 粗い石灰石
- 8: 上部砂層
- 9: 北
- 10: 3番線
- 11: 地面
- 12: 地下水位
- 13: 南
- 14: 1番線
- 15: 2番線
- 16: レール面高さ
- 17: 4番線

図-3 地盤柱状図およびトンネル断面

Phasage des travaux de la Gare Condorcet



図－４ 施工ステップ

4. 設計施工事例から得られた技術的知見（国内に適用する場合の問題点・課題等）

海外事例の条件整理を基に、類似工法を国内に適用する場合の問題点・課題等について検討を行った。その検討結果を踏まえ、浅層大断面トンネル工法の技術的提案を行う。

国内へ適用する場合は、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 人力施工による小断面連結方式は適用困難であり、断面サイズは機械施工が可能な導坑サイズとすることが望ましい。
- (2) 地質や制約条件を考慮した場合、柱列支承方式の方が適応性が高い。
- (3) 浅層地下に大断面を構築する場合は、構造的なルーフを如何に形成するかが最も重要であり、先受工に代表される NATM 的な発想よりは、むしろ、シールドや推進工法を組み合わせたルーフ形成工法が望ましい。

上記の技術的知見を踏まえると、今後の技術的課題としては、以下の点が挙げられる。

- (1) 浅層トンネルのメカニズムを解明する必要がある（浅層トンネルの土圧・アーチアクション、施工プロセスを考慮した周辺応力ほか）。
- (2) ルーフ部の形成方法を、さらに模索、検討しなければならない（構造物によるアーチ形成効果ほか）。
- (3) NATM・シールド・推進工法等の複合構造の更なる検討が必要である。

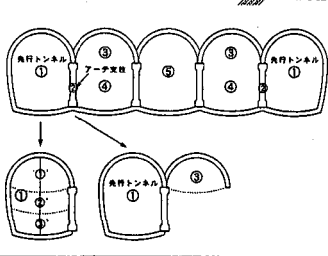
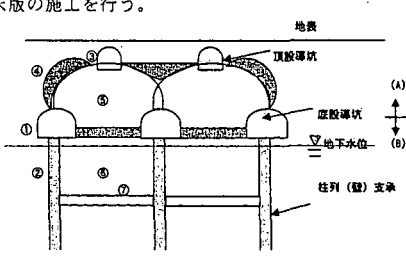
5. 浅層大断面トンネル工法の提案

浅層地下空間を非開削で施工する場合のルーフの形成方法として、従来のパイプルーフ工法等に対して

- ・小断面連結工法（小断面を連結してトンネルルーフを構築する技術）
- ・ボックスシールドやシールドの複合技術等によるトンネルルーフを構築する方法
- ・NATM と補助工法

等の技術に着目し、表－2 に示す工法の提案を行った。

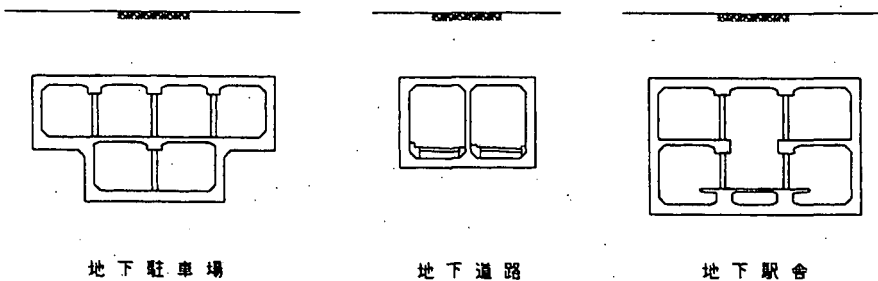
表－２ 提案工法の一覧表

工 法 概 要	(１) 小断面連結方式	(２) 柱列支承方式
	①掘削可能な小断面トンネルを掘削する。 ②先行トンネルの２次覆工と支柱を構築する。 ③隣接トンネルのアーチ部を掘削し、アーチ覆工を施工する。 ④トンネルの下半部を掘削し、アーチ支柱を構築する。 ⑤同様の施工を繰り返し、小断面の導坑を連結させ２次覆工を施工し、連続した地下空間を構築する。	①小断面の底設導坑を掘削する。 ②導坑内より柱列（壁）支承を施工する。 ③小断面の頂設導坑を掘削する。 ④頂版導坑を利用して、ルーフを形成する。 ⑤上下半インバート掘削後、底版および覆工コンクリートを施工する。 ⑥柱列（壁）支承を土留壁として利用して掘削し、 ⑦底床版の施工を行う。
		
	(３) NATM方式（プレルーフing）	(４) シールド併用法
	①トンネル外側のゆるみ領域と地下水の低下を抑制するために、本坑両側に連続壁（遮水壁）を施工する。 ②小断面の先進導坑を施工する。 ③先進導坑より横断パイプルーフを打設し、アーチ上部の土荷重を支えとともに、 ④薬液注入によりトンネル間の地盤改良を行う。 ⑤中央導坑を掘削し、中央壁を構築する。 ⑥トンネル部を掘削し、覆工コンクリートを施工する。	①緩み抑制および遮水のために本坑両側にＲＣ連壁を施工する。 ②シールド工法により先行補強ルーフを築造し、トンネル掘削時の安定性を確保するとともに周辺地山の変位抑制をはかる。 ③トンネル掘削に当たっては隔壁部を先行し、アーチ支柱として隔壁を構築する。 ④アーチ支柱構築高さにより加背割を決定しトンネル掘削を行う。

６．ケーススタディーの実施

６．１ モデルケースの設定

前述の考え方に基づいた工法および開削工法の適用性について検討するため、ケーススタディーを実施した。検討対象は地下駐車場、地下道路、地下駅舎であり、図－５に示すモデルケースを具体的に設定した。



図－５ モデルケースのイメージ図

６．２ ケーススタディー結果

ケーススタディーに基づき、各工法を浅層大断面トンネルへ適用する際の地質、地下水、地表の制約条件、工期・工費、土かぶり、施工延長、断面積・形状などを整理し、表－４と表－５に示した。

また、各工法の適用性を、各構造物の形状的な特徴に着目して表－３のように整理した。

表－3 各工法の適用性

構造物	特徴	小断面 連結方式	柱列支承方式	NATM方式	シールド 併用法
地下駐車場	断面幅が大	◎	○	○	○
地下道路、地下鉄、共同溝	延長が大	△	△	○	◎
地下駅舎	多層構造	○	◎	○	○
地下街	断面幅・延長が大	△	△	○	◎
音楽ホール、美術館、博物館、映画館	断面形状が大	○	◎	○	○
地下ダム、貯水トンネル、地下河川	円形断面も有利	△	△	◎	○
地下倉庫、地下工場、冷蔵・冷凍施設	平面形状大・延長短	◎	○	○	△
地下発電所	鉛直寸法が大	△	◎	△	△

凡例 ◎：適用が有利なケースは多い

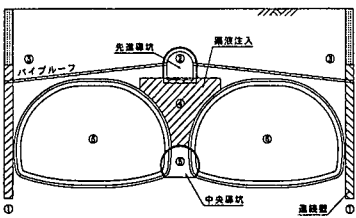
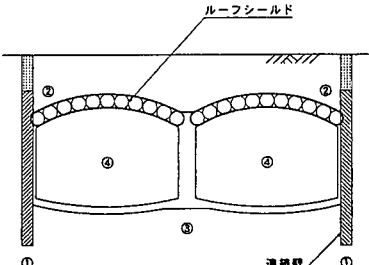
○：適用が可能なケースは多い

△：適用が可能なケースは限られる

表－4 工法比較表（1）

		(1) 小断面連結方式	(2) 柱列支承方式
概 要 図			
特 徴	メリット	小断面トンネルの施工が基本であることから、施工設備を小規模にできる。	柱列支承の形態により、遮水構造が可能。支承の長さにより鉛直方向への拡張が容易。
	デメリット	連結部分における覆工等の施工が複雑になる。施工条件によっては工期が長くなる。	柱列（壁）支承、ルーフ部の施工に工期がかかるので大延長の施設には不向き。
適 用 条 件	地質	補助工法を適用することにより未固結層まで施工可能。	未固結でも、比較的良質（N値50程度）であれば施工可能。基本的には切羽が自立することが前提となる。
	地下水	トンネル切羽の自立が必要条件となるため、地下水位が高い場合は水位を低下させる必要がある。	地下水位が導坑以下であることが必要。地下水位が高い場合は地下水位低下工法が必要となる。
	地表の制約条件	トンネル直上は基本的に占用の必要がないが、土かぶりによっては安全の点から、使用条件に制約が必要となる場合がある。	導坑が埋設物に近接している場合や、地表沈下に制約がある場合は、沈下防止対策が必要となる。
	工期・工費	土かぶり、地質等の条件から補助工法が必要になる場合、工費が高くなる。	柱列支承、天端部のルーフ形成のため、基本的に工期・工費とも長く、高くなる傾向にあるが、地表の制約条件上、開削が不可能で工期・工費に余裕のある場合に適用できる。
比 較 項 目 ぐ ー づ の 優 位 性	土かぶり	小断面トンネルの施工ということから、比較的浅い土かぶり（概ね3m）での施工ができる。	非開削で天端にルーフを形成することで土かぶり2～3m程度から可能で、深度については特に制約はない。
	延長	工費、工期などのことから道路横断程度の延長（20～50m程度）が適当と考えられる。	延長が長くなると施工性に劣るので、100m程度が最も有利となる。
	断面積・形状	トンネル幅員で15～50m程度のトンネル施工に適している。 トンネル形状は比較的自由に選択できる。 （小断面をいろんな形に結合できる）	基本的に天端部はアーチ形状であるが、支承部分の空間は矩形となり、掘削断面と利用断面のロスが少なく、形状もある程度自由である。 また、トンネル1本の断面積は150m ² 程度であるが、支承部分は500m ² 程度と大きな空間が可能である。
	工期・工費	地表制約条件が厳しい場合に優位性が出てくる。	柱列支承、ルーフ部の施工には工期がかかるが、支承終了後の掘削は容易となる。 深度が浅い場合は経済性で不利となるが、深度が深い場合には有利となっていく。

表－５ 工法比較表（２）

概要図		(３) NATM方式	(４) シールド併用工法
			
特徴	メリット	トンネル掘削に先立ちパイプルーフを施工するため、地上交通や商業施設の営業等に及ぼす影響が小さくなる。	先行して全線のルーフが完成するのでトンネル掘削時の地表面沈下を最小限に抑えられる。また、地下水位を変動させないため、地下水の保全、圧密沈下の防止に有効。
	デメリット	連壁、先進導坑、パイプルーフ、薬液注入等の仮設が多くなる。	ルーフシールドの完成後で無ければトンネル掘削に着手できないため、工期的に不利である。
適用条件	地質	N値３０以下程度の砂層、礫層、粘土層、シルト層の未固結層にも適用が可能。	軟弱シルト質土から硬質砂礫層まで広範囲な適用が可能。
	地下水	地下水位が導坑以下であることが必要。地下水位が高い場合、水位を低下させる必要がある。	地下水位が高い場合も施工可能。
	地表の制約条件	市街地での路面交通や、住居の密集により制約条件を伴う。	発進部、到達部を除き、地表には何ら影響を与えない。
	工期・工費	通常工法である大断面トンネルの両端の側壁導坑（サイロット工法）を省くことにより、工期短縮とコスト削減を図れる。	シールドマシンが高価であるため、工事区間延長が短い時は他工法に比べて経済性に劣る。
比較項目ごとの優位性	土かぶり	横断パイプルーフを打設するため、導坑の土かぶり２～３ｍ程度から適用が可能。	地下水位にもよるがルーフシールド自体は３ｍ～５０ｍまで対応可能。トンネル施工を考慮して３０ｍまでを適用範囲と考える。
	延長	トンネル延長が短い場合、マシン費の面でシールド工法より有利。	施工延長は延長５ｋｍまでは十分可能であり、長距離に有利。
	断面積・形状	断面形状は円形が基本となり、それによるロスがある。	ルーフシールドを含めた施工断面積は、他工法に比べて大きい。
	工期・工費	掘進速度が小さく、工期・工費が大となる。	工期は他工法に比べてやや遅い。 工費も他工法に比べてコスト高であり、他工法では施工できない悪条件下でのみ検討対象となり得る。

７．今後の課題と展望

地下浅層部分に、小断面トンネルを連結して大断面トンネルに拡大する工法等について、その適用性を検討したが、いずれの工法も開削工法と比較すると工費の面で不利となる。したがって、地表の制約条件などにより開削工法が困難なケースにおいて工法が採用されるものである。

その場合、地表面への影響を極力与えないためルーフ部の早期形成が重要であり、その設計・施工に関する今後の課題を整理し以下に示す。

7. 1 今後の課題

非開削浅層大断面トンネルの設計施工に際し、今後解決すべき課題を整理し表－6に示す。

表－6 今後の課題

工法	ルーフ造成方法に関する検討課題	設計方法に関する課題	その他課題
小断面連結方式	小断面トンネルを連結したものをルーフとして考え、下部に掘り下げることにより、地下大断面トンネルを形成するなどのバリエーションを有する。	小断面連結時の施工過程の応力再配分を考慮した設計法の確立	機械化への対応策の検討
柱列支承方式	頂設導坑からのルーフ形成方法として曲りボーリング等が考えられるが、より経済的で効率的な施工法の考案が必要。	ルーフの設計とルーフ継手の強度低下の問題の解決	底設導坑からの効率的な柱列支承の施工方法
NATM方式	連壁、先進導坑、パイプルーフ、薬注と仮設が多いため、本設への利用による本設支保の低減を図り、経済性を追求する。	横断パイプルーフの支保効果についての解析手法	底設導坑の省略
シールド併用法	ルーフシールドのコストダウン。	ルーフと構造体の設計方法	小口径推進工法の可能性の検討
共通	コストダウンのための改良。 必要最小土かぶり厚の低減。	ルーフを全て仮設ではなく、本設の一部とみなす設計法の確立。 ルーフの施工手順・応力分担を考慮した近接構造物への影響解析方法の確立。	工期の短縮方法

7. 2 展望

これまでのNATMでは、固結度が高い洪積層を対象としてきたが、沖積層の浅層部分では実施例が少ない。しかし、新たな補助工法の開発や、チューリップ工法、ホエールボーン工法やサーディボーン工法にみられるトンネル縦断方向でのプレルーフの技術が確立されるなら、NATMによる都市部での大断面トンネルの適用性が高まることになる。さらに、シールド工法のめざましい発展により、シールドをルーフとしNATMと組合せる工法も、浅層大断面トンネル工法への適用に大きな期待が寄せられる。

そのためには、浅層部トンネルの力学的解析を踏まえた設計方法の確立が不可欠となり、今後の研究テーマとして継続的な活動が必要と考えられる。

なお、本報告の内容は「小断面連結NATMによる浅層地下利用研究準備会」の活動成果⁴⁾⁵⁾の一部を示したものであり、平成11年4月より（社）土木学会関西支部の共同研究グループ「浅層大断面トンネルに関する調査研究会」（委員長：田村 武）において引き続き研究を進めているものである。

参考文献

- 1) 建設省：建設白書（平成10年版）、pp.78
- 2) 謝量汎胡万毅：北京地下鉄“複－八線”王府井駅 浅埋暗掘杭柱支承法方案研究
- 3) コンドルセ駅、現場説明用パンフレット
- 4) 橋本正・安田亨・市川真治・小嶋勉・長屋淳一（1999）：浅層大断面トンネル工法の設計施工事例調査・提案 トンネル工学研究論文 報告集第9巻
- 5) 東尾啓司・渡邊和憲・北村正実・内田渉・嶋村貞夫（1999）：浅層大断面トンネル工法の適用に関する研究 トンネル工学研究論文 報告集第9巻